

УДК 621.7.044

В.С. КРИВЦОВ, А.П. МЕЛЬНИЧУК, В.В. ЗАЙЦЕВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ОСОБЕННОСТИ ОПИСАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ КОНУСНОЙ ФОРМЫ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКЕ

Рассмотрен вопрос определения параметров напряженно-деформированного состояния тонкостенных деталей конусной формы при гидродинамической штамповке. Для теоретического представления этой задачи использована система дифференциальных уравнений движения тонких оболочек с учетом инерционных сил, с применением гипотезы Кирхгофа-Лява, с использованием физического закона, учитывающего упругую деформацию и линейное упрочнение материала в области пластических деформаций. Постановка задачи определения напряженно-деформированного состояния выполнена в предположении осесимметричности заготовки и детали, осесимметричности нагружения и однородности его в осевом направлении. Представленные подходы к решению допустимы также при описании напряженно-деформированного состояния многослойных конусных оболочек.

Ключевые слова: гидродинамическая штамповка, тонкостенный трубопровод, приварная арматура, конусный участок, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Трубопроводы воздушных систем летательных аппаратов (ЛА) занимают немаловажное место в его весовой структуре. Они рассчитаны на транспортировку больших объемов воздуха и находятся под действием динамических, циклических и повторно-статических нагрузок. Конструктивно трубопровод систем ЛА состоит из прямолинейных или криволинейных труб и приварной арматуры (табл. 1) [1].

Согласно руководящим техническим материалам возможны следующие технологические варианты изготовления приварной арматуры трубопроводов [2]:

– формообразование статическим давлением с применением эластичных наполнителей на универсальном прессовом оборудовании;

– гидродинамическая штамповка (ГДШ) с использованием импульсных установок типа пресспушки или гидроударные прессы.

Как показывает производственный опыт, более высокие технико-экономические показатели при изготовлении элементов приварной арматуры трубопроводов воздушных систем ЛА свойственны процессам ГДШ [1, 3].

Среди теоретических разработок по численному исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкостенных осесимметричных оболочек при их гидродинамической штамповке выполнено в последнее время моделирование и исследование процесса формообразования сфериче-

ского наконечника при оформлении его основного (генерального) контура [4 – 6].

Сферические наконечники представляют собой одни из типовых элементов соединения приварной арматуры тонкостенного трубопровода воздушных систем транспортных и пассажирских самолетов. В комплекты этих соединений входят также осесимметричные тонкостенные элементы, имеющие конусные участки – наконечник конусный, вставка сфера-конус и переходник (табл. 1).

Теоретические исследования процессов формообразования указанных элементов, которые по сути являются тонкостенными конусными оболочками, ранее в подобной (как для сферических наконечников) постановке не проводились.

Особенности операций ГДШ оболочек содержащих конусный участок

Рассматриваемая категория изделий: наконечник конусный, вставка сфера-конус и переходник – имеют ярко выраженный конусный участок, что делает подобными технологические процессы их изготовления.

Схемы типовых технологических процессов гидродинамической штамповки приварной арматуры с конусным участком представлены в табл. 2.

Особенностями практической реализации процессов ГДШ конусных наконечников и переходников является возможность одновременного получения двух деталей из одной заготовки, путем одновременной штамповки пары изделий (табл. 2).

Таблица 1

Типовые осесимметричные элементы приварной арматуры трубопроводов воздушных систем ЛА

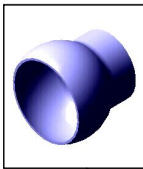


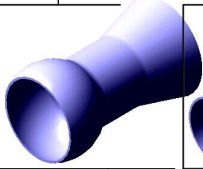
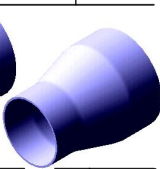

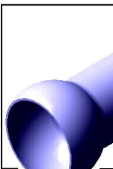
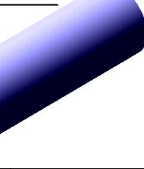
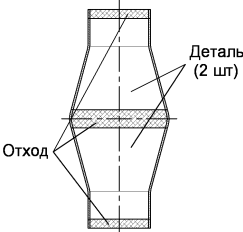
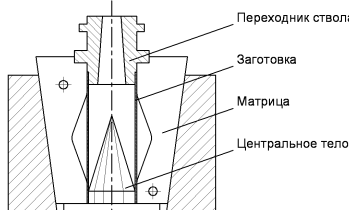
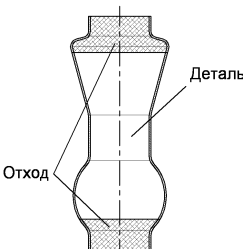
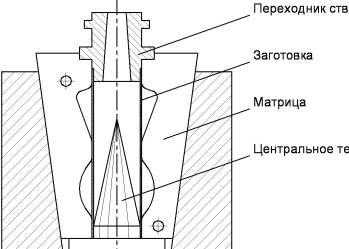
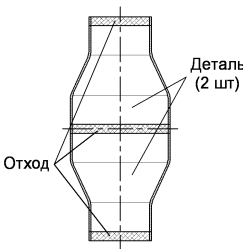
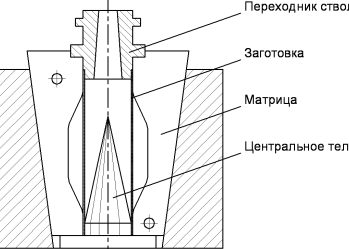
Вид осесимметричных деталей трубопроводов							
Элементы приварной арматуры с конусным участком							
							
Наименование элемента	Наконечник сферический	Наконечник конусный	Наконечник фланцевый	Вставка сфера-конус	Переходник	Бандаж	Законцовка длинномерной трубы
Материал	ПТ-7М ВТ1-0 12Х18Н10Т	ПТ-7М ВТ1-0 12Х18Н10Т	ПТ-7М ВТ1-0	ПТ-7М	ПТ-7М ВТ1-0 АМг2М	ПТ-7М ВТ1-0	ПТ-7М
Заготовка	цельнотянутая труба; сварная труба; стаканчик, полученный вытяжкой из листа						
Геометрия	диаметр трубопровода 25 – 140 мм; толщина стенки 0,8 – 1,2 мм						

Таблица 2

Схемы типовых технологических процессов ГДШ приварной арматуры с конусным участком

	Схема отштамповки	Эскиз типовой оснастки
Наконечник конусный		
Вставка сфера-конус		
Переходник		

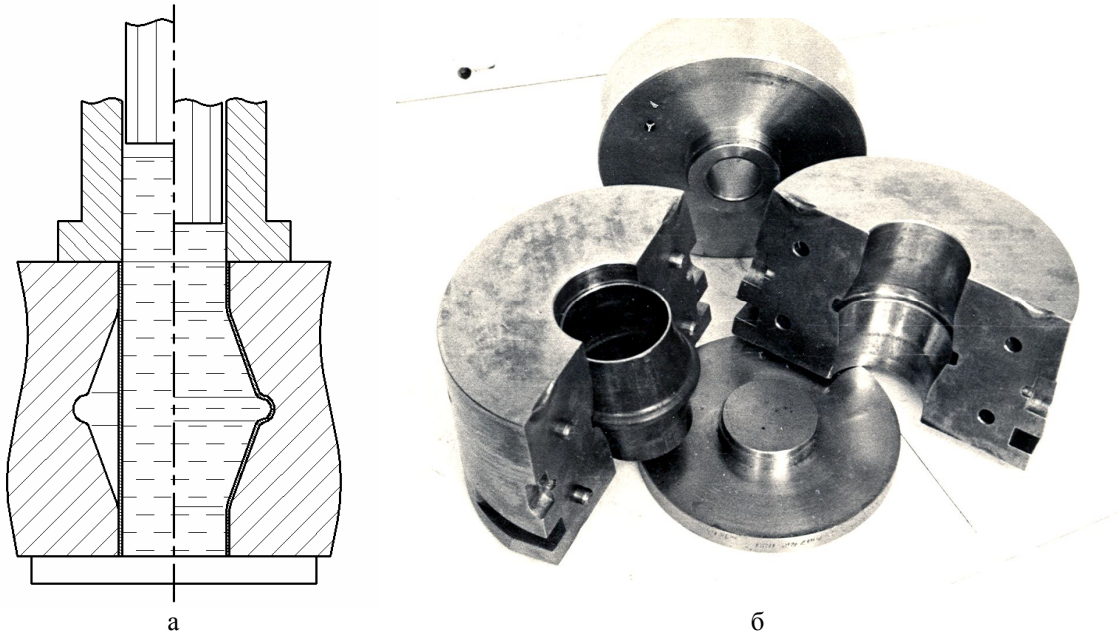


Рис. 1. Один из вариантов технологической оснастки для изготовления пары конусных наконечников: а – схема штамповки; б – технологическая оснастка

Реализация процессов ГДШ для изготовления рассматриваемых изделий возможна с использованием различных схем штамповки и конфигураций штамповой оснастки.

На рис. 1 представлен один из вариантов технологической схемы и штамповой оснастки, используемых при изготовлении пары конусных наконечников из одной трубчатой заготовки (рис. 2).

При разработке технологических операций ГДШ этих деталей и при определении параметров импульса нагружения необходимо рассмотреть три варианта построения математической модели решения задачи определения параметров (НДС) заготовки:

– при жестком закреплении торцов заготовки в матрице;

– при свободном движении торцов заготовки без учета сил трения;

– при свободном движении торцов заготовки с учетом сил трения.

При первом варианте деформирования в заготовке возникают и обеспечиваются меридиональные (вдоль образующей) положительные (растягивающие) напряжения, что понижает или исключает возможность потери устойчивости оболочки. Однако реализация этого варианта может привести к увеличению средней интенсивности деформаций в объеме детали и, как следствие, к увеличению энергии деформирования, что в конечном счете приведет к увеличению энергии, которой должен обладать снаряд (поршень) на срезе ствола.

Реализация второго варианта (свободное движение торцов заготовки без трения) очевидно приведет к меньшим энергетическим затратам, однако, как показывают эксперименты (рис. 3), и к потере устойчивости при развитии пластических деформаций в критических зонах.

Третий вариант – определение НДС заготовки как во втором случае, но уже с учетом сил трения, может быть рассмотрен только после сравнительного анализа результатов решения задачи по первому и второму вариантам и с учетом результатов натурных экспериментов.

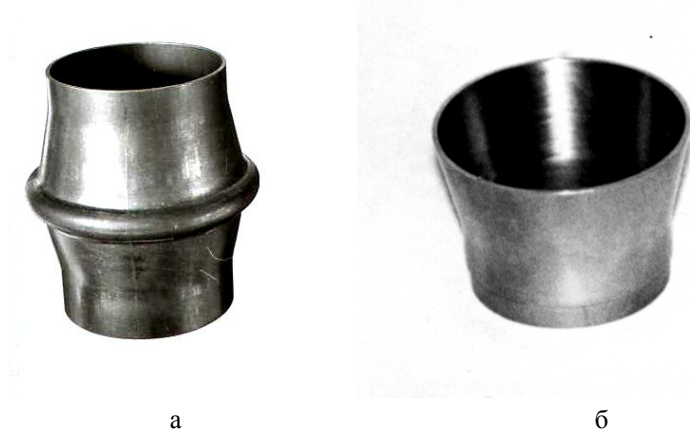


Рис. 2. Отштамповка и готовое изделие: а – отштамповка пары наконечников; б – конусный наконечник

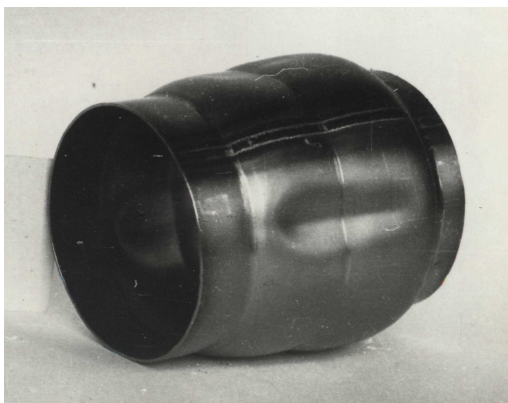


Рис. 3. Потеря устойчивости заготовки при ее деформировании

Особенности описания НДС конусных оболочек при ГДШ

Суммарная длина заготовки для изготовления вставки, пары наконечников или переходников достаточно велика, поэтому для реализации этих операций ГДШ необходимы следующие особенности технологической оснастки:

1. В пределах цилиндрических участков заготовки, близких к обоим ее торцам, должны быть расположены элементы оснастки, облегчающие ее по окружному контуру и обеспечивающие контакт заготовки с поверхностью матрицы.

2. Для выравнивания поля давления жидкости по высоте формирующей камеры, действующего на заготовку, рационально использовать центральное тело (отражатель), конфигурация, размеры и материал которого подлежат определению как теоретически, так и экспериментально.

При определении параметров поля давления, действующего на заготовку необходимо также учитывать реакцию заготовки в процессе ее деформирования.

Как показывают эксперименты [7], при ударе снаряда (поршня) о поверхность жидкости в рабочей камере возникают кавитационные явления, это делает неправомочным предположение о равномерном распределении давления на заготовку. Однако, учитывая отсутствие теоретического и экспериментального решения этой задачи, построение расчетной схемы проводится на базе использования функции $p = f(t)$ и может быть даже в форме $p = f(z; t)$ при представлении (допущении) функции $f(z)$ в линейной форме без дискретного представления реальности.

Суммируя эти соображения, считаем возможным в дальнейшем использовать (в рамках численной реализации) функции распределения давления, которые использованы в работах [3, 5].

При рассмотрении некоторых вариантов технологической схемы изготовления конусных наконечников и переходников можно заключить следующее (рис. 4):

– геометрические параметры отштамповки наконечников и переходников можно разделить на участки: линейные – a, c ; конусные – b ; радиусные переходы – r_1, r_2 ;

– наличие или отсутствие линейного участка «с» определяет конфигурацию конусного наконечника или переходника в схеме штамповки с длиной отштамповки L_k и L_n соответственно.

– данное геометрическое представление справедливо при одинаковых диаметрах заготовки и отштамповки, а также равных углах конусной части для обоих вариантов.

Обоснованность параметров НДС детали осуществляется с использованием результатов, представленных в работах [6, 8].

Эти решения справедливы при выполнении условий:

– внешние нагрузки и граничные условия осесимметричны;

– при построении расчетной модели используется только первая часть гипотез Киргофа-Лява, что позволяет производить расчет угонений в любой точке оболочки в любой момент времени.

В цилиндрической системе координат уравнения движения элемента оболочки в приращениях с учетом инерционных сил имеют вид (рис. 5):

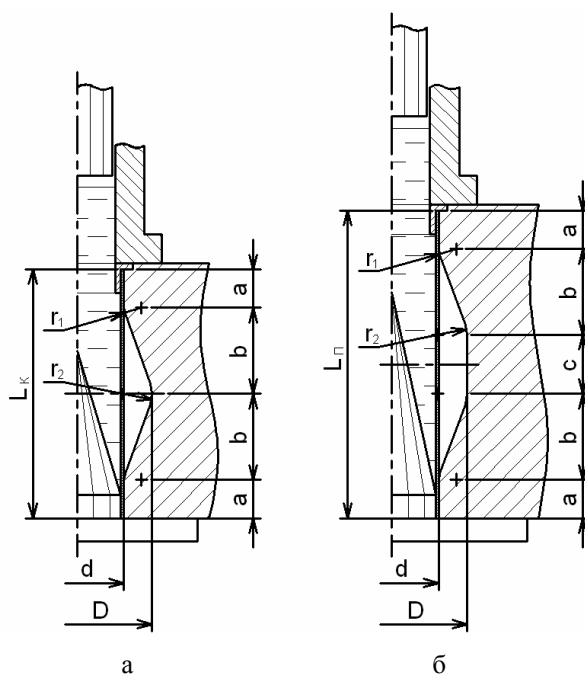


Рис. 4. Схемы и геометрические параметры технологической оснастки для изготовления деталей:
а – пары конусных наконечников;
б – пары переходников

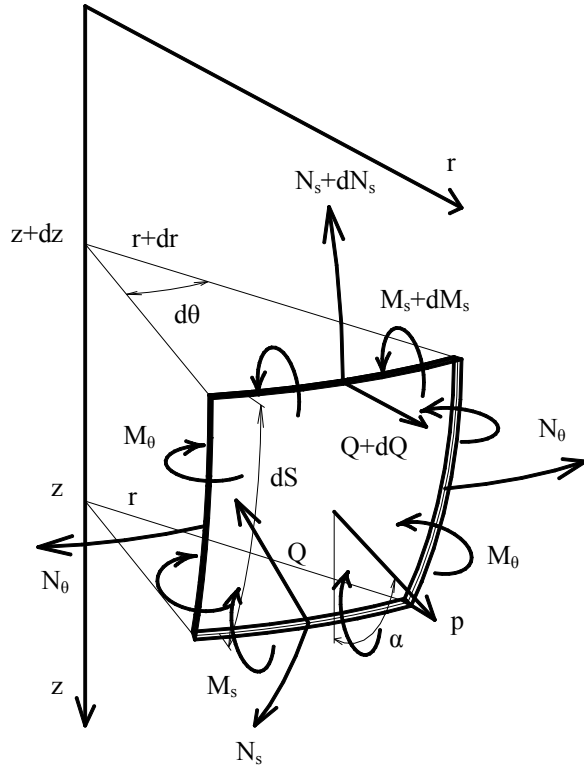


Рис. 5. Равновесие элемента тонкостенной осесимметричной оболочки

$$r h \rho \frac{d^2 r}{dt^2} = p r \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial S} (N_s r \cos \alpha) - \frac{\partial}{\partial S} (Q r \sin \alpha) - N_\theta ; \quad (1)$$

$$r h \rho \frac{d^2 z}{dt^2} = p r \cos \alpha - \frac{\partial}{\partial S} (N_s r \sin \alpha) - \frac{\partial}{\partial S} (Q r \cos \alpha); \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} (M_s r) - M_\theta \cos \alpha - Q r = 0, \quad (3)$$

где r, z – текущие эйлеровы координаты оболочки;
 h – текущая толщина оболочки;
 α – угол между нормалью к поверхности элемента оболочки и положительным направлением оси z ;

ρ – плотность материала;

S – длина дуги вдоль меридиана;

p – нормальное давление, действующее на оболочку;

Q – перерезывающая сила;

$N_s, N_\theta, M_s, M_\theta$ – продольные силы и изгибающие моменты (погонные) в меридиональном (вдоль образующей) и широтном (окружном) направлениях.

Для двухслойных (многослойных) оболочек уравнения движения элемента примут вид:

$$r \left(\sum_{i=1}^n h_i \rho_i \right) \frac{d^2 r}{dt^2} = p r \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n N_{s_i} \right) r \cos \alpha \right) - \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) r \sin \alpha \right) - \sum_{i=1}^n N_{\theta_i}; \quad (4)$$

$$r \left(\sum_{i=1}^n h_i \rho_i \right) \frac{d^2 z}{dt^2} = p r \cos \alpha - \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n N_{s_i} \right) r \sin \alpha \right) - \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) r \cos \alpha \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} \left(\sum_{i=1}^n M_{s_i} \right) r - \left(\sum_{i=1}^n M_{\theta_i} \right) \cos \alpha - \left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) r = 0, \quad (6)$$

где n – количество слоев.

При определении параметров НДС произвольного элемента конусной оболочки кроме системы дифференциальных уравнений его движения необходимо также использование физического закона материала заготовки, учитывающего упругую деформацию и линейное упрочнение в области пластических деформаций.

Рационально экспериментально полученный закон упрочнения материала аппроксимировать степенным рядом Маклорена, удерживая в нем количество членов, обеспечивающее заданную степень точности аппроксимации

$$\sigma_i = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j \varepsilon_i^j, \quad (7)$$

где σ_i – интенсивность напряжений;

ε_i – интенсивность деформаций;

a_0, a_j – коэффициенты аппроксимации.

Выводы

В статье определен круг задач, требующих исследования при определении напряженно-деформированного состояния тонкостенных деталей конусной формы при гидродинамической штамповке. Основные опорные моменты научной работы:

– разработка методики теоретического описания НДС конусных оболочек при реализации гидродинамического нагружения;

– разработка математической модели и проведение исследований параметров НДС конусных оболочек при ГДШ.

При реализации процессов ГДШ допустимо использовать вариант аппроксимации функции нагружающего воздействия на заготовку в виде $p = f(t)$.

Результаты решения при определенных допущениях можно использовать при описании НДС многослойных конусных оболочек.

Литература

1. Мильченко Е.И. Исследование, разработка и внедрение технологических процессов изготовления высокоресурсного особотонкостенного титанового трубопровода воздушных систем ЛА: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Мильченко Евгений Иванович. – Х., 1981. – 149 с.
2. Руководящий технический материал: Производство сварного высокоресурсного трубопровода. РТМ 1.4.1999-90 – М.: НИАТ, – 1991. – 234 с.
3. Мацукин Ю.Г. Исследование гидродинамической штамповки на пресс-пушке: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Мацукин Юрий Григорович. – Х., 1966. – 223 с.
4. Полтарушников С.А., Брагин А.П., Мильченко Е.И. Деформированное состояние деталей типа сферических и конических законцовок трубопроводов / С.А. Полтарушников, А.П. Брагин, Е.И. Мильченко // Импульсная обработка металлов давлением. – 1984. – Вып. 12. – С. 21-26.
5. Кривцов В.С. Особенности описания деформирования тонкостенных цилиндрических деталей при гидродинамической штамповке / В.С. Кривцов, А.П. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2001. – Вып. 25. – С. 28-34.
6. Мельничук А.П. Моделирование технологических процессов гидродинамической штамповки законцовок трубопроводов воздушных систем летательных аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Мельничук Александр Петрович. – Х., 2006. – 207 с.
7. Родько С.Я. Исследование, разработка и внедрение процессов гидродинамического формообразования тонколистовых деталей летательных аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Родько Сергей Яковлевич. – Х., 1985. – 238 с.
8. Уитмер. Большие динамические деформации балок, колец, пластин и оболочек / Уитмер, Балмер, Лич, Пиан // *Ракетная техника и космонавтика*, – 1963. – № 8. – С. 111-123.

Поступила в редакцию 5.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии производства летательных аппаратов М.Е. Тараненко, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», Харьков.

ОСОБЛИВОСТІ ОПИСУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ КОНУСНОЇ ФОРМИ ПРИ ГІДРОДИНАМІЧНОМУ ШТАМПУВАННІ

В.С. Кривцов, О.П. Мельничук, В.В. Зайцев

Розглянуто питання визначення параметрів напружено-деформованого стану тонкостінних деталей конусної форми при гідродинамічному штампуванні. Для теоретичного виразу цієї задачі використано систему диференціальних рівнянь руху тонких оболонок з урахуванням інерційних сил, із застосуванням гіпотези Кірхгофа-Лява, з використанням фізичного закону, що враховує пружну деформацію та лінійне зміцнення матеріалу в області пластичних деформацій. Постановка задачі визначення напружено-деформованого стану виконано з припущеннями вісесиметричності заготовки і деталі, вісесиметричності навантаження та його однорідності в осьовому напрямку. Представлені підходи до рішення припустимі також при описуванні напружено-деформованого стану багат шарових конусних оболонок.

Ключові слова: гідродинамічне штампування, тонкостінний трубопровід, приварна арматура, конусна частина, напружено-деформований стан.

PECULIARITIES OF DEFLECTED MODE DESCRIPTION FOR THIN-WALLED CONE-SHAPED PARTS UPON THE HYDRODYNAMIC STAMPING

V.S. Kryvtsov, A.P. Melnychuk, V.V. Zaytsev

The article examines the determination of deflected mode parameters for thin-walled cone-shaped parts upon the hydrodynamic stamping. The system of differential equations of motion for thin shells, takes the inertial forces, Kirchhoff hypothesis and the physical law into consideration. The physical law takes elastic deformations and linear hardening for plastic deformations into consideration. The part and the blank are supposed as axisymmetric, the loading is supposed as axisymmetric and homogeneous in axial direction. The analyzed approaches can be applied also for multilayer cone shells.

Key words: hydrodynamic stamping, thin-walled pipeline, welded reinforcement, cone sector, deflected mode.

Кривцов Владимир Станиславович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии производства летательных аппаратов, ректор Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Мельничук Александр Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Зайцев Вячеслав Васильевич – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.